

## Список использованных источников

1. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача: учеб. для вузов. – изд. 4-е, перераб. и доп. – М.: Энергоиздат, 1981. – 415 с.
2. Тепловой расчет котлов (Нормативный метод). – изд. 3-е, перераб. и доп. – СПб.: НПО ЦКТИ, 1998. – 255 с.
3. Развитые поверхности теплообмена / Д. Керн, А. Краус [и др.]. – М.: Энергия, 1977. – 80 с.
4. Тепловой и гидравлический расчет теплообменных аппаратов компрессорных установок: Учебное пособие / Т.Г. Гавра, П.М. Михайлов, В.В. Рис [и др.]. – Л.: Ленинградский политехнический институт имени М.И. Калинина, 1982. – 33 с.
5. Теплофизические свойства технически важных газов при высоких температурах и давлениях: справочник / В.Н. Зубарев, А.Д. Козлов, В.М. Кузнецов и др. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 232 с.

УДК 669.042

**И. В. Глухов, Г. В. Воронов, И. В. Плесакин**

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

## ОСОБЕННОСТИ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ В РАБОЧЕМ ПРОСТРАНСТВЕ СОВРЕМЕННОЙ ДУГОВОЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ

### Аннотация

*В работе рассмотрены температурные поля рабочего пространства современной дуговой сталеплавильной печи емкостью 120 тонн (ДСП–120). Температурные поля были получены с помощью компьютерного моделирования в программе SolidWorks Flow simulation. В работе произведен анализ расположения ТСУ по варианту фирмы «Danieli», а также схемы установки горелок рекомендованной авторами.*

*Ключевые слова: дуговая сталеплавильная печь, температура, металл, шихта, горелка, фурма, факел, электрод, свод, стена.*

### Abstract

*The paper discusses the temperature field of modern electric arc furnace with a capacity of 120 tons workspace (DSP–120). The temperature field were obtained by computer modeling program SolidWorks Flow simulation. The paper produced TSU location analysis according to an embodiment of the company «Danieli», as well as the installation of burners scheme recommended by the authors.*

*Keywords: electric arc furnace, temperature, metal, charge, a burner lance, the torch electrode vault wall.*

Современная дуговая сталеплавильная печь (ДСП), как основной сталеплавильный агрегат для переработки железосодержащей шихты, получает распространение на вновь вводимых и модернизируемых металлургических заводах. Способ загрузки шихты (в две бадьи на болото) и постоянно изменяющаяся плотность шихты (от 0,2 до 0,9 т/м<sup>3</sup>) создают дополнительные трудности в организации теплового, аэродинамического и температурного режимов.

С позиции применения разнотипных энергоносителей современную ДСП следует рассматривать как комплексный тепловой агрегат, в котором используют помимо электрической энергии, природный газ и кислород по способу пламенных сталеплавильных печей, а также

твердое топливо (кокс) по принципу карбюраторного процесса [1]. Приход теплоты за счет экзотермических реакций настолько значителен (38%), что такой процесс приобретает признаки автогенного. Включение в работу газокислородных горелок, кислородных фурм, инжекторов порошкообразных материалов существенно влияет на температурное состояние в рабочем пространстве печи.

По нашему мнению, многие реализуемые технические решения (к примеру, компании Danieli) относительно размещения специальных энергоподводящих элементов на стенах и в эркере печи предназначаются исключительно для повышения производительности печи, но в полной мере не обеспечивают высокого уровня теплоиспользования. Отсутствуют условия для создания дополнительной рассредоточенной теплоотдачи в зонах с недостаточным подводом тепла к материалам холодной шихты. В процессе работы топливокислородных горелок преобладающую роль имеет конвективная передача тепла, поскольку газокислородный факел обладает малой излучательной способностью, а легковесная шихта характеризуется низкой начальной температурой и развитой поверхностью для теплообмена с продуктами горения. Помимо прочего, конвективная теплоотдача функционально зависит от скорости и кинематической вязкости продуктов горения, условий аэродинамического взаимодействия с тепловоспринимающей поверхностью. Используемые способы подвода теплоты газокислородными горелками на действующих и предлагаемых печах по условиям теплопередачи не совсем рациональны [2]. Для создания равномерно рассредоточенного температурного поля на поверхности шихты, находящейся в промежутке между электродами и внутренней поверхностью стены ДСП, потребуется изменить способ установки энергоподводящих элементов, следуя рекомендациям [3; 4].

Экспериментальное измерение температуры и наблюдение за ее распределением в объеме печи практически неосуществимо, но возможно с помощью современных методов компьютерного моделирования. Решение задачи было найдено путем расчета математической модели в пакете SolidWorks Flow simulation.

Для определения температурного состояния ДСП для модели были установлены следующие граничные условия:

- начальная температура продуктов горения на входе в объект (срез сопла горелки) определена стехиометрическим расчетом горения природного газа в кислороде и составила 2700 °С;
- температура на выходе из объекта (срез дымоотводящего канала) из анализа статистических данных [4] принята равной 1600 °С;
- теплоотдача от газов к шихте постоянна и равномерно рассредоточена по рассматриваемому объему.

Для снижения вычислительной нагрузки не рассматривалось тепловыделение от электрических дуг и химических реакций в расплавляемой шихте.

К рассмотрению предложены две модели, отличающиеся размещением комбинированных устройств для подачи в печь энергоносителей (ТСУ). В первой модели ТСУ расположены радиально в соответствии с проектными рекомендациями фирмы «Danieli» (вариант А), во второй – исходя из рекомендаций авторов и размещены тангенциально (вариант Б).

На рис. 1, б можно наблюдать за расположением изотерм для предложенного авторами [3; 4] варианта установки газокислородных горелок. Температурное состояние в объеме рабочего пространства печи стало упорядоченным, подобным распределению аэродинамических потоков [3].

На рис. 2 и 3 показано поле температур в продольном осевом сечении и в горизонтальной плоскости печи. Температурное поле внутри печи неоднородно. Очевидно, что радиально направленные факелы горелок формируют область высоких температур в центральной части объема печи. Часть поверхности электрода, обращенная наружу (навстречу факелу), подвергается интенсивному разогреву направленным потоком высокотемпературных газов. Только в области межэлектродного пространства при слабом движении газов сохраняется узкая область относительно низких температур (рис. 2). Неравномерность распределения температур присутствует и по всей высоте внутреннего объема печи (рис. 3). Направ-

ленное действие высокотемпературных газов на электроды приводит к их повышенному расходу (1,65 кг/т).

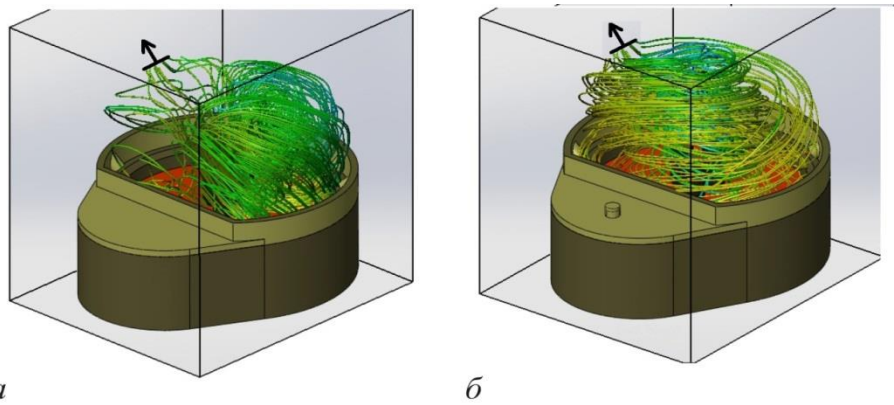


Рис. 1. Траектория газовых потоков в объеме рабочего пространства по варианту «Danieli» и при рекомендованном расположении ТСУ:  
а – по проекту «Danieli»; б – при рекомендованном размещении ТСУ

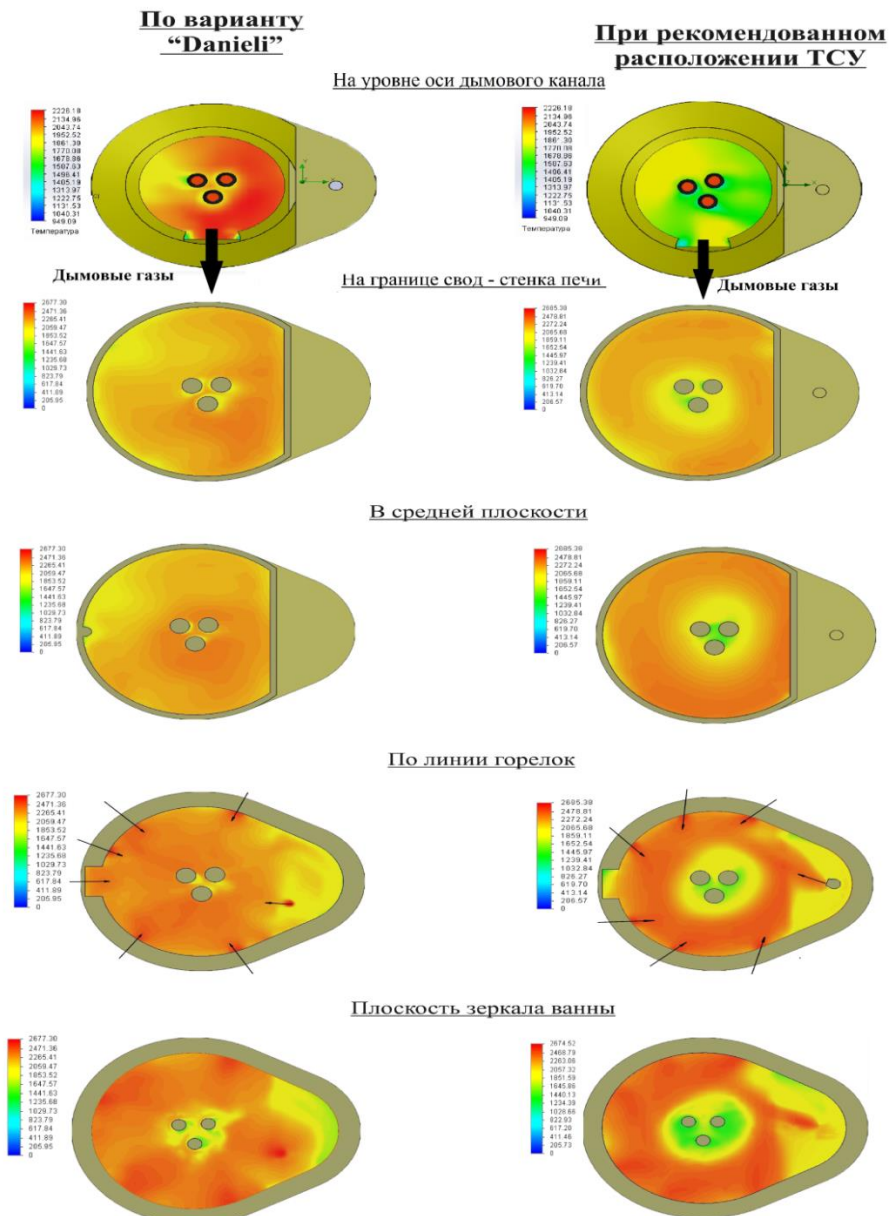


Рис. 2. Поле температур в поперечных сечениях печи

Существующее расположение (вариант компании Danieli) топливосжигающих устройств обеспечивает высокотемпературное поле только вблизи зон их установки.

Равномерного распределения температур на всей поверхности холодной шихты не наблюдается. В эркерной зоне и на участках между горелками обнаружены плохо прогреваемые поверхности, тогда как вблизи зон установки горелок происходит перегрев и выгорание шихты. Печь имеет значительные тепловые потери, поскольку наблюдается сосредоточение высоких температур поверхности водоохлаждаемых стены и свода печи.

Тангенциальное расположение горелок, изменяет траекторию потоков продуктов горения [2] и вместе с ним распределение температур в объеме печи. Горизонтальная циркуляция газов повышает долю конвективного теплообмена, способствует равномерному распределению температур у поверхности шихты и по всей высоте рабочего пространства (см. рис. 2 и 3). Отмечается заметное снижение температуры в центре печи. Наиболее высокие температуры обеспечиваются в нижней части объема печи, а зона высоких температур распространяется практически на всю поверхность загруженной шихты. Благодаря использованию поворотной горелки улучшается прогрев эркерной зоны печи.

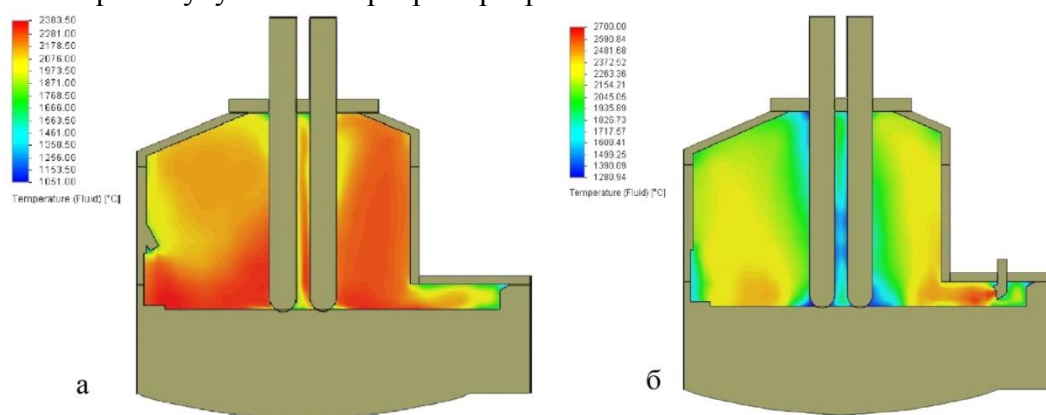


Рис. 3. Поле температур в продольном сечении рабочего пространства  
а – по проекту «Danieli»; б – при рекомендованном размещении ТСУ

При сопоставлении температурных полей двух вариантов размещения ТСУ наблюдается существенное снижение воздействие продуктов горения на электроды. Также уменьшается контакт высокотемпературных газов с поверхностью водоохлаждаемых конструкций печи. Рассредоточенный подвод и организованное движение продуктов горения в печи обеспечивают высокий температурный уровень на поверхности шихты, интенсивный нагрев ее при высоком уровне теплоиспользования.

В заключение можно отметить, что предложенный способ интенсивного нагрева и плавления холодной шихты позволяет за счет организации движения продуктов горения газокислородной смеси, частичного окисления углеродсодержащих материалов, без изменения номинальной электрической мощности и при незначительных конструктивных изменениях обеспечить высокую производительность ДСП по выходу полупродукта стали, снизить удельный расход электродов и повысить эксплуатационную надежность стеновых панелей и свода.

#### Список использованных источников

1. Старцев В.А. Скрап-карбюраторный процесс при производстве стали в мартеновских печах / В.А. Старцев, Г.В. Воронов, В.И. Лобанов [и др.]. – Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2004. – 225 с.
2. Воронов Г.В. Особенности аэродинамики в рабочем пространстве современной дуговой сталеплавильной печи / Г.В. Воронов, М.В. Антропов, О.В. Порох // Новые огнеупоры. 2014. № 7. – С. 19–21.

3. Voronov G.V. Aspects of the aerodynamics in the working space of a modern electric-arc steelmaking furnace / G. V. Voronov, M. V. Antropov, O. V. Porokh // Refractories and Industrial Ceramics. 2014. Vol. 55, № 4. P. 285–287.

4. Воронов Г.В. Газодинамика рабочего пространства современной дуговой сталеплавильной печи / Г.В. Воронов, М.В. Антропов, И.В. Глухов // Новые огнеупоры. 2014. № 11. С. 23–25.

5. Гудим Ю.А. Производство стали в дуговых печах. Конструкции, технология, материалы: монография / Ю.А. Гудим, И.Ю. Зинуров, А.Д. Киселёв. – Новосибирск: НГТУ, 2010. – 547 с.

УДК 621.1.016.4

**Н. В. Гребнева, В. В. Лавров, Н. А. Спирин**

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

## **РАЗРАБОТКА КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ В ПАКЕТЕ ANSYS ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОТЫ ВОДО-ВОЗДУШНЫХ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ И ПРОВЕДЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ**

### **Аннотация**

*Современный инженер невозможен без знания систем автоматического проектирования, автоматического производства и автоматического инженерного анализа. Одним из самых распространенных комплексов, позволяющих решить данные задачи, сегодня является программа ANSYS, использующая метод конечных элементов. Программный модуль ANSYS FLUENT имеет широкий спектр возможностей моделирования течений жидкостей и газов для промышленных задач с учетом турбулентности, теплообмена, химических реакций. С помощью данного модуля смоделирован процесс движения жидкости в лабораторной установке «Изучение водо-воздушных теплообменников» для теплообменного аппарата с естественной конвекцией.*

*Ключевые слова:* Теплообменный аппарат, компьютерное моделирование, ANSYS FLUENT, создание твердотельной модели, наложение сетки, граничные условия.

### **Abstract**

*The modern engineer is impossible without knowledge of systems of automated designing, automatic production and the automatic engineering analysis. One of the most widespread complexes allowing to solve these problems is the ANSYS, program using a method of final elements. The program module ANSYS FLUENT has a wide range of opportunities of modeling of currents of liquids and gases for industrial tasks taking into account turbulence, heat exchange, chemical reactions. By means of this package, process of the movement of liquid in the laboratory installation "Studying of Air-and-water Heat Exchangers" for the heatexchange device with natural convection is simulated.*

*Keywords:* Heat exchanger, computer modeling, ANSYS FLUENT, creation of a solid model, grid overlay, boundary condition.

Подготовка профессионального исследователя и инженера невозможна без обучения современным системам автоматического проектирования (CAD, Computer Aided Design) и автоматического инженерного анализа (CAE, Computer Aided Engineering) [1]. Многие задачи, с которыми приходится в настоящее время сталкиваться в научно-исследовательской и производственной сферах, не поддаются аналитическому решению либо требуют больших финансовых и временных затрат на экспериментальную реализацию по схеме «проектирова-